

# 多种绿色能源形态下的虚拟电厂定价机制研究

焦丰顺<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 任畅翔<sup>2</sup>, 谭杰仁<sup>2</sup>, 张植华<sup>1</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518033; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 含多种绿色能源的虚拟电厂研究正在成为智能电网研究和试点的热点, 但如何优化调度, 激励参与资源的积极性和可持续性, 同时实现系统的补贴成本最小, 是虚拟电厂定价机制的难点。[方法] 基于用户柔性负荷, 电动汽车, 储能, 分布式电源四类资源参与虚拟电厂调度开展参与方式和参与成本的分析, 根据资源和商业模式差异单独设定成本模型; 通过测算不同资源的实际参与边际成本, 采用类似现货市场出清的方式, 依据系统调整负荷需求, 进行可调资源的排序, 最终确定补贴价格的上限。[结果] 利用该定价机制, 从经济角度实现对电力经济价值较低、响应潜力大的用户优先进行调度, 实现电力资源的合理分配, 保证参与资源的成本得到补贴的同时系统补偿成本最小。[结论] 基于实际算例测算, 证明文章定价机制及方法准确有效, 可为未来虚拟电厂的补贴政策提供支持。

**关键词:** 虚拟电厂; 定价机制; 绿色能源

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0133-07

## Research on Pricing Mechanism of Virtual Power Plants Containing Multiple Green Energy Sources

JIAO Fengshun<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, REN Changxiang<sup>2</sup>, TAN Jieren<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518033, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Objective] The research on virtual power plants with multiple green energy sources is becoming a hotspot of smart grid research, but how to optimize the scheduling resources, ensure that resources to participate in the enthusiasm and sustainability, and achieving the subsidy system cost minimum, is a key problem for virtual power pricing mechanism. [Methods] Based on user flexible load, electric vehicle, energy storage, distributed power supply, analysis of participation mode and participation cost, separately set cost model according to resource and business model differences; by measuring the actual participation marginal cost of different resources, with the method of similar to the spot market clearing, according to the system load demand, adjustable resource sorting, ultimately determine the subsidy price ceiling. [Results] The pricing mechanism is used to realize the priority of users with low power economic value and great response potential from the economic point of view, to realize the reasonable distribution of power resources, to ensure that the cost of participating resources is subsidized and the system compensation cost is the smallest. [Conclusion] Based on the actual calculation, it proves that the pricing mechanism and method of this paper are accurate and effective, and can provide support for the future subsidy policy of virtual power plants.

**Key words:** virtual power plant; pricing mechanism; green energy

集合多种绿色能源, 实现与电网供需的双向互动的虚拟电厂模式是电力需求侧管理的一种, 相比需求侧管理, 虚拟电厂特点在于一是增加供给, 实现潮流的双向流动, 二是实现自动负荷控制, 无需用户切断电源, 在不停电情况下调整负荷达到需求侧管理的要求。

虚拟电厂作为实现电力系统中电力供需友好互动重要手段, 将电力用户的柔性负荷或分布式发电资源根据电网调度信号以及价格信号改变原有的发电模式, 实现与电网的友好互动, 以达到减少或推移某时段的用电负荷或者调节分布式发电资源的电力供应的效果, 从而保证电网系统的安全与稳定, 实现系统的效益最大化。

自2012年开始, 国家在北京、唐山、佛山、苏州、江苏、上海等省市陆续开展了需求响应的试点工作。

收稿日期: 2019-04-16 修回日期: 2019-05-06

基金项目: 深圳供电局规划专题项目“绿色电力供需友好互动商业模式定价机制研究”(2018规专0014)

但试点工作在开展的过程中仍面临着定价机制不清晰、用户参与程度不高等问题,影响了需求响应在全国范围内的推广及应用。本文对多种绿色能源形态下的虚拟电厂定价机制研究,拟解决需求侧响应资源补贴成本的优化及补贴的可持续问题。试点城市具体补贴机制及存在问题如表1所示。

表1 试点城市补贴机制及问题

Tab. 1 Pilot city subsidy mechanism and problems

政策类型	试点城市	资金来源	存在问题
政府补贴机制	北京 佛山	政府资金补贴(中央 财政+地方配套资金) 用于需求侧补贴。	审批时间较长; 无市场化机制,完全 依靠政府财政。
尖峰电价机制	江苏	高峰时段额外收取大 工业尖峰电价1毛, 用户需求侧补贴。	变相加大了高峰期企 业用电成本,与现价 段国家降低工商业电 价诉求矛盾。

## 1 虚拟电厂定价的研究现状及应用情况

### 1.1 国内外虚拟电厂的应用

自2007年起,欧洲以开展以集成中小型分布式发电单元为主要目标的虚拟电厂研究项目,参与的国家包括德国,英国,西班牙,法国,丹麦等,目前已实施的虚拟电厂项目包括:德国卡塞尔大学太阳能供应技术研究所的试点项目、欧盟虚拟燃料电池电厂项目、欧盟FENIX项目等。北美则较少采用“虚拟电厂”概念,而是主要推进利用用户侧可控负荷的需求响应。亚太地区,虚拟电厂应用走在前端的是澳大利亚和日本。

在国内,虚拟电厂属于较新的概念,2015-2017年陆续在上海,江苏,浙江等地开展了虚拟电厂的试点,主要以上海商业楼宇和江苏的居民侧虚拟电厂试点为主,取得了较好的社会,经济,环境效益。

### 1.2 虚拟电厂定价理论及实践

目前对虚拟电厂定价的研究主要围绕单一能源类型而展开,如针对可中断负荷(Interruptible Load, IL)、储能系统或电动汽车充电设施等。对于可中断负荷定价,目前的研究提出了不同的定价方法,何永秀等<sup>[1]</sup>提出了采用国家或地区的投入-产出表与投入产出分析方法对失负荷价值(Value of Lost Load, VOLL)进行计量;Fahrioglu M等<sup>[2]</sup>则通过将用户的电力需求曲线进行简化处理,将用户的失负荷成本表示为用户负荷中断量的二次函数,并计入一个用以反映用户单位负荷中断成本及停电

意愿的参数;施泉生等<sup>[3]</sup>则结合消费者剩余利润导出了具体到IL用户的VOLL公式;Fahrioglu M等<sup>[4]</sup>则摒弃了失负荷价值的概念,在不需要知道用户失负荷价值的情况基于博弈论构建了激励兼容的合同。

另外,随着V2G(Vehicle-to-Grid)技术的成熟,以及电动汽车的普及和使用,电动汽车作为分布式微电源参与电网调峰,提高电网的安全性与经济性,具有广阔的前景<sup>[5-6]</sup>。对电动汽车充电并考虑V2G情况的电价研究目前已经较为完善。此外,储能系统、分布式电源系统参与辅助服务市场的定价机制等方面也已经有了较为充实的研究<sup>[7-8]</sup>。

但是以上的研究均是着眼于单一的能源类型,一个综合的系统中参与需求响应的分布式能源类型往往不是单一的,对单一能源类型的定价机制在此边界条件下其适用性仍有待商榷。因此本文的目的是构建一种综合多种绿色能源形态的需求响应定价机制,为需求侧响应商业模式的推广和开展提供参考。

## 2 虚拟电厂资源供给特征和商业模式

1) 工商业与居民:参与虚拟电厂调度的为的工商业及居民的柔性负荷。其中柔性负荷又可分为可转移负荷及可削减负荷,两种类型的负荷都对电价敏感,但是可转移负荷在一定的用电周期内总用电量保持固定,而可削减负荷的用电行为具有较大的灵活性,当其认为电价过高(大于临界心理价格)时即减少直至取消用电行为,但也不在另外的时间段继续该用电行为,如空调用电、娱乐用电等。本文考虑可削减负荷控制的方式,即用户侧用电设备通过智能控制终端设备接收需求响应信号自动触发并执行与编程好的响应策略。激励的方式可采取补偿激励和价格引导,补偿激励中电力用户的收益主要由两方面构成,一方面为用户通过减少或转移高峰时段用电量获得节电收益,另一方面为通过削减高峰负荷获得的补贴收益。价格引导中可设定尖峰电价或调整峰谷价差改变用户用电习惯。用户柔性负荷商业模式及激励方式如表2所示。

2) 储能系统:电化学储能作为一种高性能的需求侧响应资源,可实时调整充放电功率及充放电状态,建设在电网侧可具备2倍于自身装机容量的调峰能力。(1)对于用户侧储能,其用于参与需求侧响应的负荷实际上来自自用负荷的转移,因此

表2 用户柔性负荷商业模式及激励方式

Tab. 2 User flexible load business model and incentive method

参与资源类型	商业模式	激励方式	具体激励措施
用户柔性负荷	直接负荷控制	补偿激励型	自动响应, 基于高峰期削减负荷量, 按照固定价格/kW补贴, 根据系统成本最小约束和用户意愿确定补偿价格。增值服务及用户节电收益, 为用户提供用电账单明细, 节能建议等, 基于自动响应测算用户年成本节省。
用户柔性负荷	直接负荷控制	价格引导型	设定尖峰电价或调整峰谷电价差。

对这部分负荷削减进行补偿的方式完全等同于用户柔性负荷, 可按照用户柔性负荷进行补偿; (2) 对于独立运行的储能电站, 可集成为虚拟电厂为电网提供需求侧响应调峰服务, 对独立接受虚拟电厂调度参与需求侧响应的储能项目按其作为电网提供的放电负荷给予相应补贴。储能系统商业模式及激励方式如表3所示。

表3 储能系统商业模式及激励方式

Tab. 3 Energy storage system business model and incentives

参与资源类型	商业模式	激励方式	具体激励措施
储能	独立接受虚拟电厂调度	补偿激励型	自动响应, 基于高峰期放电功率, 按照成本原则补偿。
储能	与用户侧组成共同体参与虚拟电厂调度	补偿激励型	作为用户侧削减负荷的方式, 不对储能单独补贴。

3) 电动汽车: 电动汽车充电设施接入电网系统后, 如果没有相关的电价或者补贴机制对用户的充电行为进行引导, 将会加大电网运行优化控制的难度, 并影响电能质量。但在一定的电价机制下, 电动汽车充电设施则可以转化为对系统有益的资源, 可以实现与储能系统相似的功能。电动汽车参与虚拟电厂有充电和放电两种模式。(1) 充电模式下, 同用户柔性负荷, 可采用价格引导及补偿激励方式, 价格引导可采取峰谷平电价和实时电价, 实现系统高峰期充电负荷削减; 补偿激励型针对直接负荷控制的方式, 即系统运营商在用电高峰时段以远程方式直接限制充电桩的充电负荷, 这类电动汽车用户根据其高峰时段削减的充电负荷量, 按照固定的价格获得相应补偿; (2) 放电模式下, 电动汽车的车用电池电网负荷高峰可作为分布式的储能元件, 将电池中的电能输送回电网, 为电网提供容量支持, 这类电动汽车用户根据其作为电网提供的放电负荷获得相应补贴。电动汽车商业模式及激励

方式如表4所示。

表4 电动汽车商业模式及激励方式

Tab. 4 Electric vehicle business model and incentives

参与资源类型	商业模式	激励方式	具体激励措施
电动汽车	充电	价格引导型	采用大工业或工商业峰谷平电价或调整, 类似现货市场实时电价。
电动汽车	充电	补偿激励型	自动响应, 基于高峰期削减负荷量, 按照成本原则补偿。
电动汽车	放电	补偿激励型	自动响应, 基于高峰期放电功率, 按照放电成本用户意愿确定补偿价格。

4) 分布式发电: 分布式发电一般分布在用户侧, 具有响应速度快, 距离负荷中心近的特点, 为优质的调峰资源。分布式发电分为独立发电资源和用户侧发电资源, 独立发电资源可参考现有电价制度补贴, 用户侧发电资源由于主要为自发自用、余电上网, 这类项目如果接受虚拟电厂调度, 必然需减少其发电量的自发自用比例, 从而给用户造成的经济损失, 因此对这部分负荷削减需进行补偿, 补偿方式完全等同于用户柔性负荷, 即按照固定的价格对用户参与需求侧响应前后高峰期削减的负荷量进行补贴, 补偿价格按用户失负荷的平均价值进行确定。电动汽车商业模式及激励方式如表5所示。

表5 电动汽车商业模式及激励方式

Tab. 5 Distributed generation business model and incentive method

参与资源类型	商业模式	激励方式	具体激励措施
分布式发电	独立接受虚拟电厂调度	价格引导型	参考上网电价。
分布式发电	与用户侧组成共同体参与虚拟电厂调度	补偿激励型	作为用户削减负荷的方式, 不对分布式发电单独补贴。

### 3 定价机制

#### 3.1 系统成本效益约束

对于激励型的需求侧响应, 为了使需求侧相应电价可以有效得驱动各类响应资源, 需满足参与方的成本效益约束, 即参与方收益大于成本, 同时从经济性角度看, 需满足整体补偿成本最小。

##### 1) 参与方成本效益约束

对于电网公司而言:

$$C_{e_c} + C_{e_s} \leq B_{e_1} + B_{e_2} \quad (1)$$

式中:  $C_e$  为虚拟电厂中电网企业需承担的成本, 包括虚拟电厂建设成本  $C_{e_c}$ , 虚拟电厂电网补贴成本  $C_{e_s}$ ;  $B_{e_1}$  减缓或减少输配电投资的效益,  $B_{e_2}$  为减少为提高供电可靠性带来的输配电运维成本。

对于参与的资源而言:

$$MCr_i \times Qr_i \leq Brs_i + Brr_i \quad (2)$$

式中： $MCr_i$  为  $i$  类资源参与虚拟电厂的度电边际成本； $Qr_i$  为  $i$  类资源参与虚拟电厂的电量； $Brs_i$  为第  $i$  类资源参与虚拟电厂的补贴收益； $Brr_i$  为  $i$  类资源参与虚拟电厂的节省的电费收益。

对于政府而言：

$$Cg_c \leq Bg_1 + Bg_2 \quad (3)$$

式中： $Cg_c$  为虚拟电厂中政府财政补贴的成本； $Bg_1$  虚拟电厂的环境效益； $Bg_2$  虚拟电厂的税收及就业效益。

### 2) 整体补偿成本最小条件

假设  $Q_i(P_i)$  是分布式能源  $i$  在价格  $P_i$  的需求侧响应服务的供给量，那么整体，那么则应当满足整体补偿成本最小条件：

$$\min P_i \cdot Q_i(P_i) \quad (4)$$

并且满足  $Q_i(P_i) \geq Q_{i0}$ ， $Q_{i0}$  为系统需要的需求侧响应服务的最低供给量。

## 3.2 用户参与成本分析

1) 用户柔性负荷：用户柔性负荷参与需求侧响应的成本，我们主要通过计算负荷损失给用户造成的经济损失来衡量，从产电比的角度来估算，其成本可以写成以下的形式<sup>[5]</sup>：

$$C_1 = \frac{\Delta Q}{Q_{i0}} \times \frac{N}{G} \quad (5)$$

式中： $C_1$  表示用户柔性负荷失负荷的平均价值； $\Delta Q$  表示用户削减负荷量； $Q_{i0}$  表示用户初始用电负荷； $N$  表示部门总的消费者剩余即部门增加值； $G$  为部门的全年电力消耗。

2) 电动汽车充电设施：电动汽车充电设施的负荷分为两种，一种是电动汽车充电负荷，其成本即为充电桩的售电服务费即为削减充电桩负荷的机会成本，因此电动汽车削减充电负荷参与需求侧响应的成本可直接参考充电桩削减负荷的收益损失：

$$C_2 = \frac{T}{24} \times S_c \times \Delta Q \quad (6)$$

式中： $T$  表示充电桩在一天 24 h 的时间内实际使用小时数； $S_c$  表示电动汽车充电服务费。这里假设充电桩的使用在一天 24 h 中均匀分布。

另一种是电动汽车放电负荷，首先电动汽车入网放电需要充电成本，其中含充电服务费和充电电价两部分；其次，充放电过程会给电池带来损耗并

损失部分电量；再次，放电过程要借助充电桩这一中介，需支付租金；最后，因放电期间不能驾驶汽车给用户出行带来不便，从而导致用户效用的损失。因此，电动汽车放电负荷参与需求侧响应的成本可以表示为：

$$C_2 = k \times (S_c + P_L + \frac{P_B}{N_B} + \frac{T}{24} \times S_c) / E_c \times \Delta Q \quad (7)$$

式中： $S_c$  表示电动汽车充电服务费； $P_L$  表示充电价格； $S_c + P_L$  即为电池充电成本； $P_B$  表示电池成本； $N_B$  表示电池循环次数； $\frac{P_B}{N_B}$  表示电池一度电增加一次循环带来的损耗； $\frac{T}{24} \times S_c$  为占用充电桩资源给其带来的服务费减少； $E_c$  表示电池充放电效率；系数  $k$  为常数，用来衡量户会失去用于驾驶汽车出行的带来的效用损失，其取值需通过调研确定。

3) 储能系统：储能系统可分为两类，一类是装在用户侧的储能系统，其用于参与需求侧响应的负荷实际上来自用户自用负荷的转移，因此用户侧储能系统参与需求侧响应成本完全等同于直接削减用户柔性负荷的成本；另一类是独立的储能电站，根据现阶段辅助服务市场的情况，独立储能电站主要的盈利模式为提供调频辅助服务，目前储能参与 AGC 调频能够获得的收益主要包括调频里程补偿以及调频容量补偿。因此，这类储能在用电高峰段接受虚拟电厂调度参与需求侧响应调峰的成本即为这段时期内减少的调频收益以及因参与需求侧响应调峰增加的电池损耗成本：

$$C_3 = (2 \times (N_F \times P_{F1} + N_F \times T_F \times P_{F2}) + \frac{P_B}{N_B}) \times \Delta Q \quad (8)$$

式中： $N_F$  表示储能平均每天参与调频的次数； $P_{F1}$  表示调频里程补偿价格； $T_F$  表示每次调频的平均时长； $P_{F2}$  表示调频容量补偿价格，考虑储能参与 1 h 需求侧响应调峰需要额外占用一个 1 h 进行充电，这段时间储能无法参与调峰市场，因此需对这段时间的损失进行补偿，所以乘以系数 2；此外， $P_B$  表示储能电池成本； $N_B$  表示储能电池循环次数； $\frac{P_B}{N_B}$  表示储能电池增加一次循环带来的损耗。

4) 分布式电源：与储能相类似，分布式电源也可以分为两类，一类是用户侧的以自发自用为主要运行模式的电源，其成本等于直接削减用户柔性负荷的成本；另一类是独立运营的分布式电源，考虑到分布式电源增加出力并不会造成其度电成本的

上升, 其增加出力部分发出的电量还能通过上网回收成本, 因此虚拟电厂调度独立的分布式电源项目增加出力参与需求侧响应调峰并不需要给予额外的补贴。

### 3.3 价格测算

从整个需求侧影响市场来看, 价格测算的目标是选择合适的用户和中断容量使得总赔偿成本最小, 即:

$$\min C(\Delta Q) = \min(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = \min \left( \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta Q_i)^2}{Q_{i0}} \left( \frac{N}{G} \right) + C_2(\Delta Q_{j1} + \Delta Q_{j2}) + C_3(\Delta Q_{j3}) + C_4(\Delta Q_{j4}) \right) \quad (9)$$

式中:  $C_1$  为用户柔性负荷成本 (含用户侧储能和分布式电源);  $C_2$  为电动汽车充放电负荷成本;  $C_3$  为独立运行储能电站参与需求侧响应调峰的成本;  $C_4$  为独立分布式电源参与需求侧响应调峰的成本。  $\Delta Q_i$  为  $i$  部门用户的柔性负荷削减量 (含用户侧储能和分布式电源);  $(N/G)_i$  表示  $i$  部门用户的电力经济价值;  $\Delta Q_{j1}$  为电动汽车充电负荷削减量;  $\Delta Q_{j2}$  为电动汽车放电负荷;  $\Delta Q_{j3}$  为独立运行储能电站参与需求侧响应调峰的负荷;  $\Delta Q_{j4}$  为独立运行分布式电源参与需求侧响应调峰的负荷。

此外, 所有用户中断容量的总和需满足系统备用要求:

$$s.t. \sum_{i=1}^k \Delta Q_i + \Delta Q_{j1} + \Delta Q_{j2} + \Delta Q_{j3} + \Delta Q_{j4} = \Delta Q_{\text{总}} \quad (10)$$

且用户需要保留其重要负荷:

$$\Delta Q_{\min} \leq \Delta Q \leq \Delta Q_{\max} \quad (11)$$

式中:  $\Delta Q$  表示用户参与需求侧响应调峰的负荷;  $\Delta Q_{\min}$  表示电网公司规定的用户参与需求侧响应必须满足的最低削减负荷;  $\Delta Q_{\max}$  表示用户在保证其重要负荷 (进一步削减负荷带来的损失远大于电网公司的补贴) 的情况下能削减的最大负荷。

从上节的成本分析函数来看, 电动汽车、储能 (独立) 及分布式电源 (独立) 的边际成本为常数, 不随负荷的变化而变化。因此, 可得全部四类用户需求侧响应负荷的总的边际成本曲线, 这也是所有用户总的供给曲线, 如图 1 所示: 该供给曲线为向上倾斜的折线。

而电网公司总赔偿成本最小的点就是赔付价格等于用户总的边际成本的点 ( $P=MC$ ), 即参与调

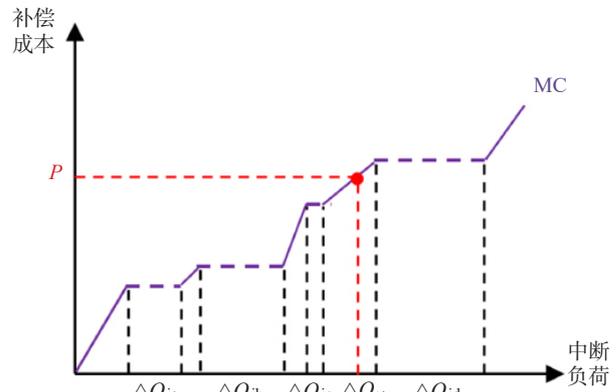


图 1 用户调整负荷的总供给曲线

Fig. 1 Total supply curve of user adjusted load

整负荷的所有用户失负荷总的边际价值即为电网公司实现赔偿成本最小时需支付的补偿价格。

当补偿价格大于电动汽车、储能 (独立) 或分布式电源 (独立) 用户参与需求侧响应的成本 (边际成本为常数) 即  $P > MC(\Delta Q_{ji})$  时, 电网公司在实施需求侧响应优先调度该类用户资源。

图 1 中  $\Delta Q_{ji}$  为参与需求侧响应调峰的电动汽车充电负荷、电动汽车放电负荷、独立运行储能电站负荷、独立运行分布式电源负荷, 四类负荷中边际成本小 (补贴价格低) 的优先调度, 从左往右 4 个  $\Delta Q_{ji}$  分别表示上述四类负荷。

总之, 电网公司对调整负荷的赔偿价格越高用户参与需求侧响应可削减的负荷总量同样越多。

## 4 算例分析

根据定价模型, 选取某地区高新技术园区作为需求侧响应试点区域, 论证定价机制可行性并进行成本效益分析。试点区域的参与用户的容量及电量如表 6 所示:

表 6 参与用户的容量及电量

Tab. 6 Capacity and power of participating users

项目名称	变压器	峰期	峰期	谷期	总电量 /MWh
	装机容量 /GW	电量 /MWh	电量 /MWh	电量 /MWh	
创业大厦	7.050	280	310	93	683
软件基地用地	42.150	2 021	2 267	969	5 258
园区一	20.400	759	864	416	2 039
园区二	39.060	1 551	1 714	649	3 914
园区三	30.992	471	518	241	1 230
园区四	32.000	82	117	66	265

根据调研数据,用户充电桩负荷为5 MW,全部负荷均可参与需求侧响应;储能站的负荷10 MW,同样全部可接受虚拟电厂调度参与需求侧响应调峰;电动汽车放电负荷为10 MW,其中仅1 MW负荷能够在高峰段入网放电;园区总的用电负荷为40 MW,其中能够参与需求侧响应的空调、照明等用户柔性负荷为4 MW。

用户柔性负荷方面,考虑到该园区用户的特性,我们在计算园区用户柔性负荷的电力经济价值时参照该地区金融、房地产、商务及居民服务业部门的数据,即取值64.45元/kWh。依据上节中的模型可得用户柔性负荷的可中断量为一条向上倾斜的曲线,即电网公司的补偿价格随着用户切负荷量的增加而上升,当用户切负荷量为1 MW(2.5%)时,用户单位小时要求的补偿价格为1.61元/kW,当用户切负荷量为4 MW(10%)时,用户单位小时要求的补偿价格为6.45元/kW。用户柔性负荷供给曲线如图2所示:

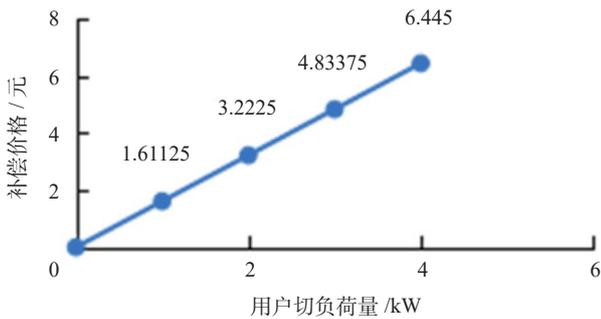


图2 用户柔性负荷供给曲线(元/kW)  
Fig. 2 Supply curve of user flexible load (RMB/kW)

而对于充电桩、储能、电动汽车放电等负荷来说,其参与需求侧响应负荷的供给成本为固定的常数,因此其供给曲线均为水平直线,仅供给价格和供给数量存在差异。具体来说,充电桩高峰段削减负荷的成本为0.2元/kW,储能参与需求侧响应的补贴成本为0.4元/kW,电动汽车入网放电的补贴成本为5.32元/kW。

进一步对补贴成本的合理性进行分析,如表7所示:

综上,我们可以得到整个园区可中断负荷的供给曲线,如图3所示。可以看到,当园区高峰时段总的中断负荷需求为20 MW时,用户进行需求

表7 补贴成本合理性对标

Tab. 7 Rationality of subsidy cost

负荷	算例测算成本	对标	合理性分析
用户柔性负荷	金融、房地产、商务及居民服务业部门 6.445元/kWh	上海居民柔性负荷补贴标准未 2元/kWh	根据行业经济增加值取数,服务业增加值高于居民,合理
储能	0.4元/kWh	南方区域调峰补助 0.5元/kWh	合理
充电桩	0.2元/kWh	全天度电服务 费0.8元/kwh×20%(利用率)=0.16元/kWh	合理
电动汽车放电	5.32元/kWh	用户意愿不确定性	合理

侧响应切负荷1 h能获得的补偿价格均为6.445元/kW,用户获得的总的赔偿费用为12.89万元。其中用户柔性负荷削减4 MW,总共获得补偿2.58万元;储能削减10 MW,获得补偿6.45万元;电动汽车充电负荷削减5 MW,获得补偿3.22万元;电动汽车放电负荷削减1 MW,获得补偿0.64万元;如表8所示。根据“谁收益,谁承担”的原则,虚拟电厂的收益方主要包括政府,电网企业和高可靠性要求的用电企业,因此,此部分虚拟电厂响应补贴金额应基于收益大于成本原则,在各受益方之间分摊。

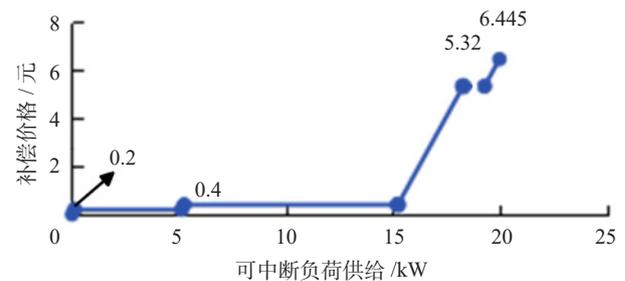


图3 可中断负荷供给曲线(元/kW)  
Fig. 3 Supply curve of interruptible load(RMB/kW)

表8 园区负荷参与需求侧响应的成本

Tab. 8 Cost of load participation in DRS in the park

分类	基础负荷/MW	可削减负荷/MW	补偿价格/(元·kW <sup>-1</sup> )
用户柔性负荷	40	4	6.445
储能	10	10	0.4
电动汽车充电负荷	5	5	0.2
电动汽车放电负荷	10	1	5.32

### 5 结论

本文基于我国需求侧响应补贴电价机制和可持续发展问题, 并结合虚拟电厂的基本特征, 对参与资源的商业模式和激励方式进行了详细的分析, 根据参与方成本效益约束模型和系统成本最小约束模型, 分析了用户柔性负荷、充电桩、储能、电动汽车参与虚拟电厂的商业模式和补贴价格测算方法, 并采用补贴成本排序方法, 确定了资源的调度优先级, 进而得到多方成本效益约束条件下的最低补贴价格。本文的意义有如下方面:

1) 根据电力资源对不同类用户的经济价值, 从经济角度对用户切负荷损失进行定量分析, 能够实现虚拟电厂对于参与资源的优化调度, 对电力经济价值较低、中断潜力大的用户优先进行调度, 实现电力资源的合理分配。

2) 基本参与各方的成本效益约束, 并确保补偿费用在各用户间实现公平合理分摊。同时定价机制使利益相关方参与收益大于等于参与成本, 实现帕累托改进, 同时可基于“谁收益谁承担”的原则, 确定补贴资金的来源。

3) 本文的定价机制的定价方法可使虚拟电厂补贴可方案获得持续性发展, 可为后续项目决策和政府补贴政策提供有力支撑。

#### 参考文献:

[1] 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 基于投入-产出法的电力失负荷价值研究 [J]. 电网技术, 2006, 30 (1): 44-49.  
HE Y X, HUANG W J, TAN Z F, et al. Study on value of lost load based on input-output method [J]. Power Grid Technology, 2006, 30 (1): 44-49.

[2] FAHRIOGLU M, ALVARADO F. Using utility information to calibrate customer demand management behavior models [J]. Power Engineering Review, IEEE, 2001, 2 (4): 71-71.

[3] 施泉生, 李士动. 基于失负荷价值的可中断负荷定价研究 [J]. 华东电力, 2013, 41 (8): 1722-1727.  
SHI Q S, LI S D. Research on interruptible load pricing based on loss of load value [J]. East China Electric Power, 2013, 41 (8): 1722-1727.

[4] FAHRIOGLU M, ALVARADO F L. Designing incentive compatible

contracts for effective demand management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (4): 1255-1260.

[5] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy [J]. Journal of Power Sources, 2005, 144 (1): 280-294.

[6] FERNAACUTENDEZ P L, ROMAACUTEN G S T, COSSENT R. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution-networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (1): 206-213.

[7] 王静, 赵伟哲, 张礼珏, 等. 储能系统参与电力系统调频的辅助服务定价方法 [J]. 黑龙江科技信息, 2016 (31): 119.  
WANG J, ZHAO W Z, ZHANG L J, et al. Auxiliary service pricing method for energy storage system participating in power system frequency modulation [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016 (31): 119.

[8] 曹筱欧, 王冬, 周静, 等. 含储能及新能源发电的居民侧需求响应 [J]. 信息与控制, 2017, 46 (3): 379-384.  
CAO X O, WANG D, ZHOU J, et al. Resident-side demand response of energy storage and new energy generation [J]. Information and Control, 2017, 46 (3): 379-384.

#### 作者简介:

焦丰顺 (通信作者)

1984-, 男, 吉林双辽人, 高级工程师, 博士, 主要从事电网规划和能源互联网研究工作 (e-mail) 497940490@qq.com。



焦丰顺

张杰

1985-, 男, 湖南常德人, 工程师, 工程硕士, 主要从事电网规划及项目评审工作 (e-mail) 393289561@qq.com。

任畅翔

1989-, 女, 湖南益阳人, 硕士, 经济师, 主要从事电网经济咨询工作 (email) renchangxiang@gedi.com.cn。

谭杰仁

1990-, 男, 广东茂名, 硕士, 经济师, 主要从事电网经济咨询工作 (email) tanjieren@gedi.com.cn。

张植华

1976-, 女, 广东汕头人, 工程师, 双学士, 主要从事电网规划和能源互联网研究工作 (e-mail) relaxhome@qq.com。

(责任编辑 郑文棠)

### 广告

国内首个电厂搬迁 EPC 总承包工程第一套机组投产.....封二  
海南文昌燃气蒸汽联合循环电厂首台机组投运.....封三